



Evaluation environnementale des systèmes de culture pérennes. Comment appréhender la complexité multi-échelle ?

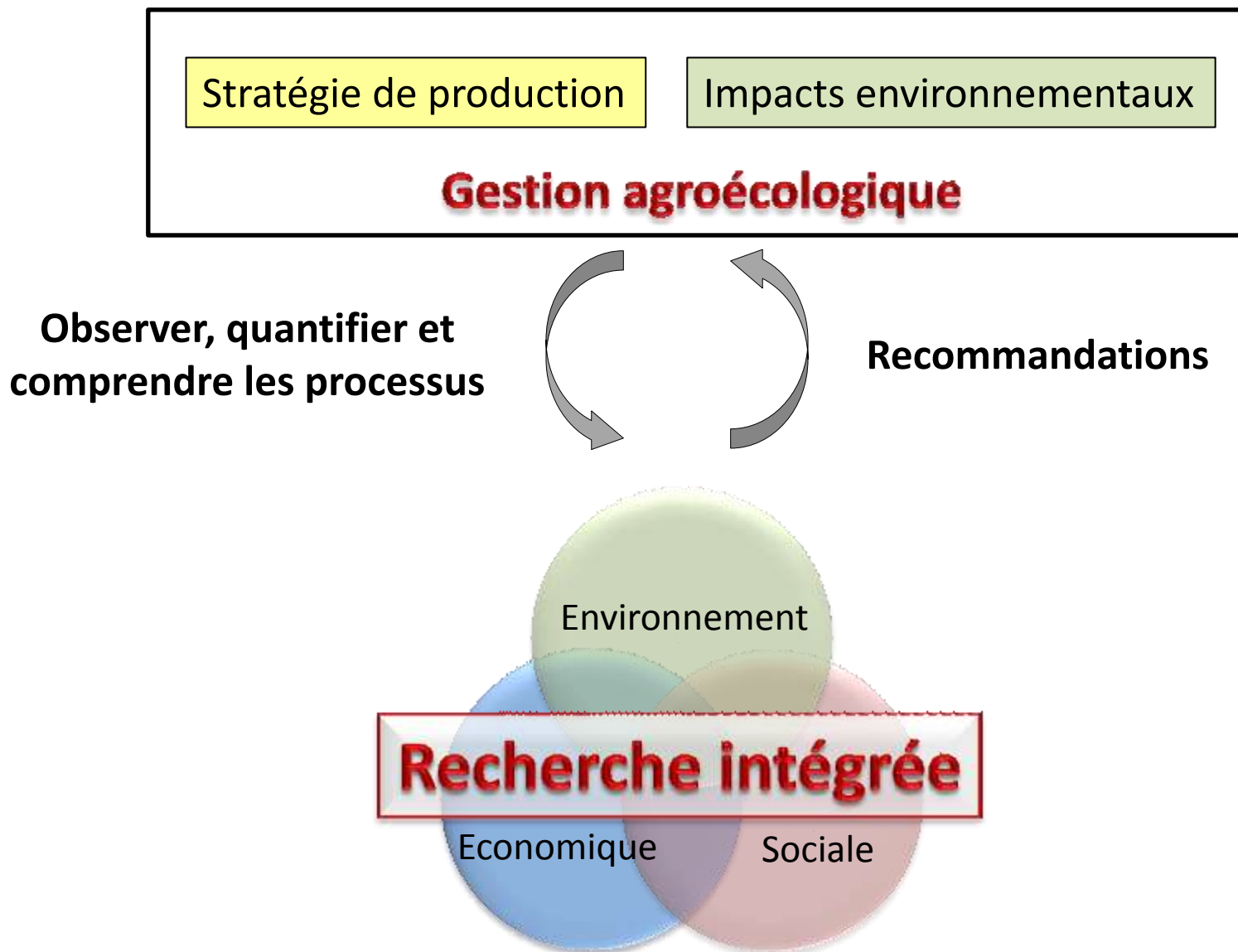
Irina Comte^{abc}, Marc-Philippe Carron^a, François Colin^c

^a UPR Systèmes de pérennes CIRAD

^b McGill University (Montréal)

^c Montpellier SupAgro UMR-LISAH

Une gestion agroécologique nécessaire



Des processus aux caractéristiques différentes

Processus biophysiques OU anthropiques

Ex : photosynthèse / pratiques agricoles

Processus continus OU discontinus dans le temps

Ex : évapotranspiration / crue dans un cours d'eau

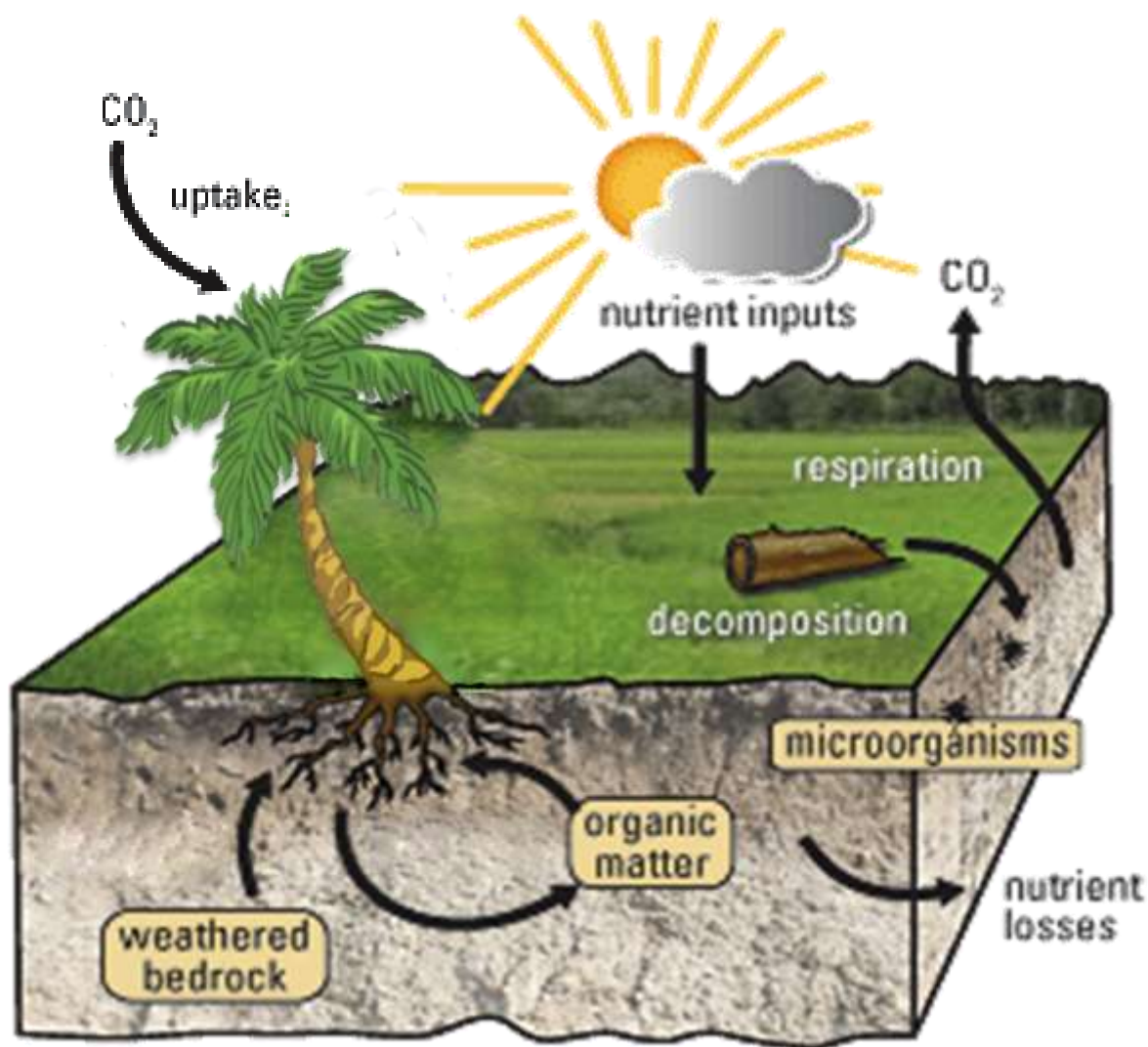
Processus lents -> Rapides

Ex : pédogénèse / ruissellement

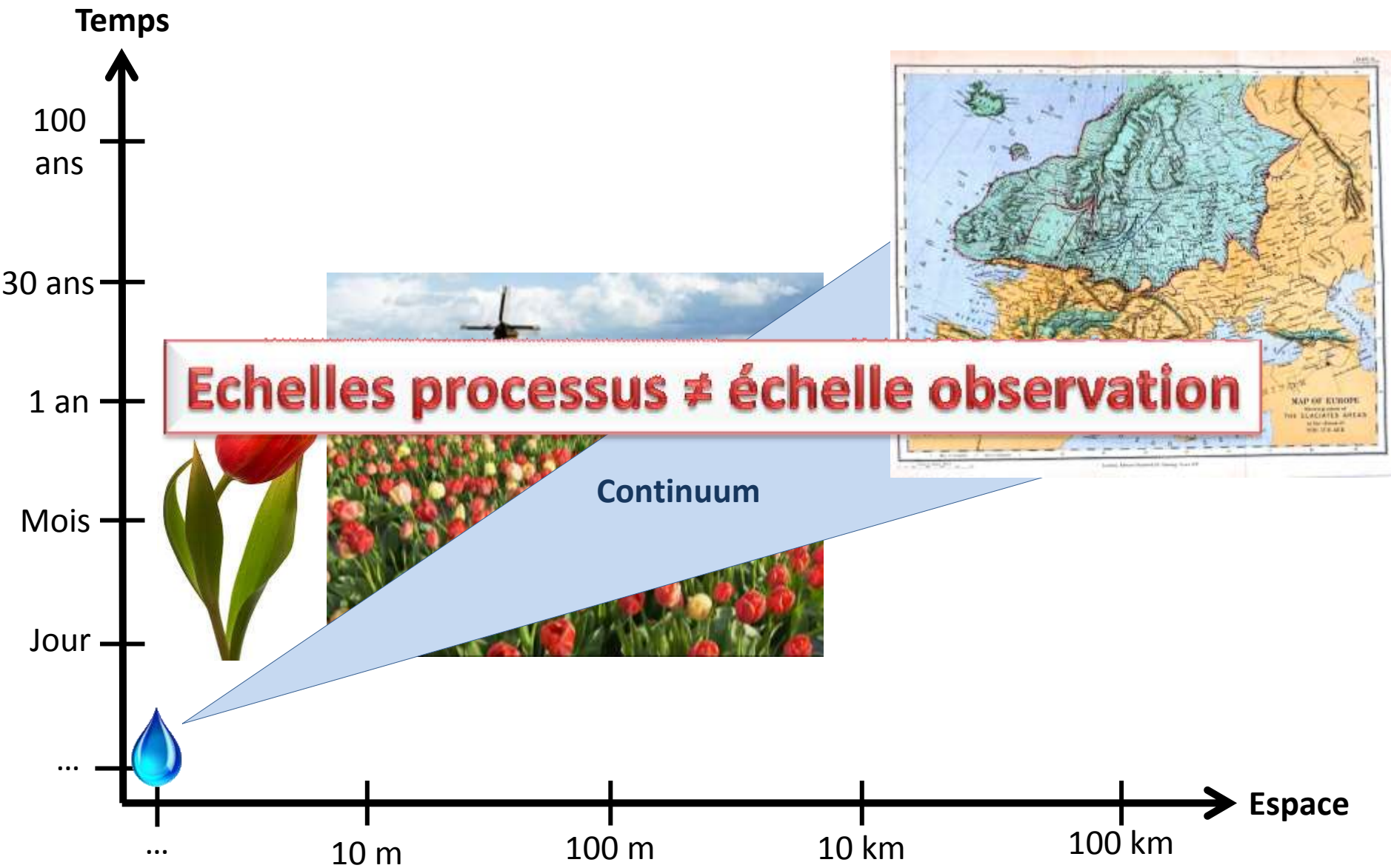
Processus multilocaux OU spatialement dépendants

Ex : minéralisation dans le profil de sol / écoulement amont-aval

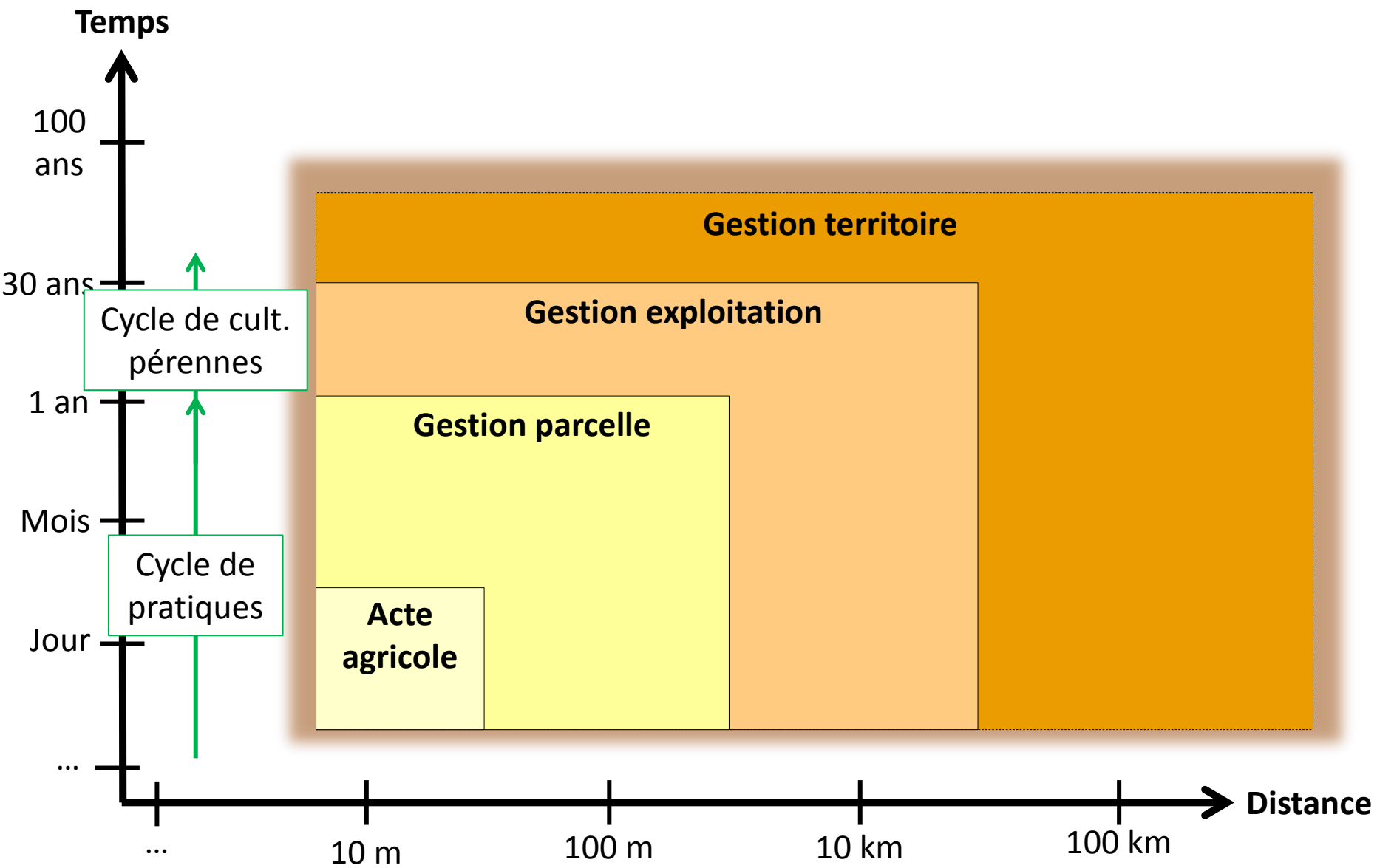
Des processus interconnectés



Des processus biophysiques multi-échelles



Des stratégies multi-échelles de gestion de la production agricole



Hétérogénéité intrinsèque des systèmes

- Conditionnée par les forçages climatique, lithologique et anthropique



- Hétérogénéité considérée dépend de l'échelle d'observation
- Nécessaire pour l'analyse comparée de systèmes en place (vs systèmes expérimentaux)

Objectif : observer, quantifier et comprendre les processus

Processus diversifiés
& Interconnectés

Gamme d'échelles
spatio-temporelles

Echelles de gestion de la
production (anthropique)

Systèmes
hétérogènes



Processus difficiles à appréhender pour une compréhension intégrée

Adapter dispositifs de mesures en fonction des objectifs et des contraintes

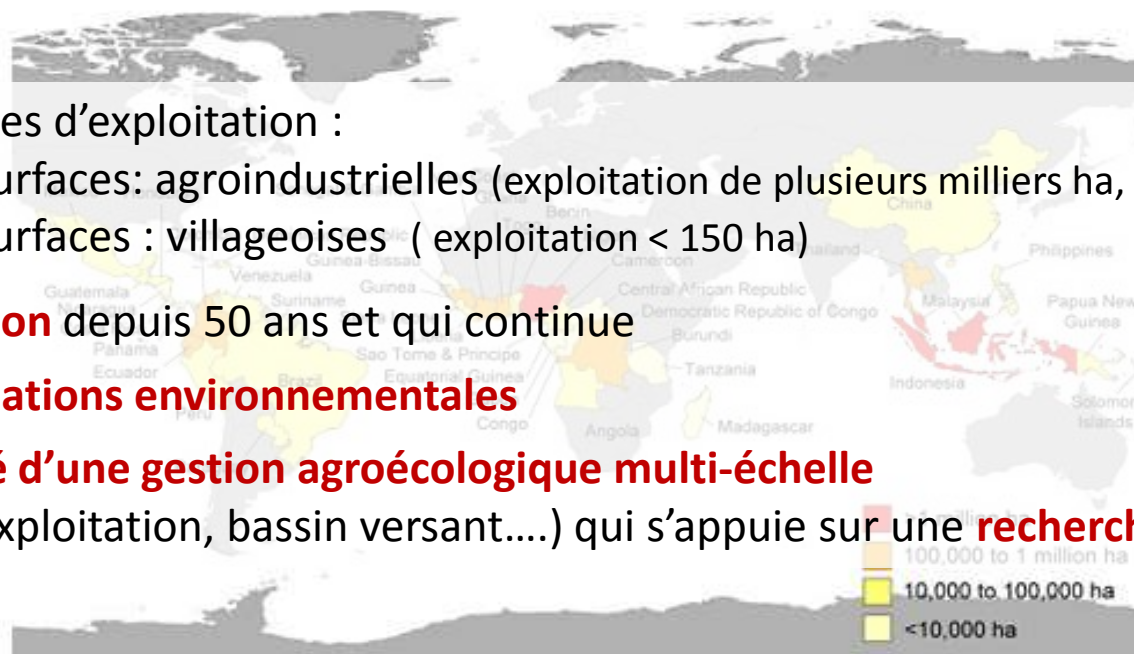
Méthodes et protocoles adaptés :

- Effet mesurable, quantifiable
- Représentatif du processus, fonction de la question de recherche
- Analyse comparée -> hétérogénéité suffisante, correspondant au facteur étudié
- Sous contraintes technique, logistique, budgétaire, temporelle

La culture du palmier à huile

Indonésie = 1^{er} producteur mondial avec 8 millions ha

- Différents types d'exploitation :
 - 40 % des surfaces: agroindustrielles (exploitation de plusieurs milliers ha, parcelle = 30 ha)
 - 60 % des surfaces : villageoises (exploitation < 150 ha)
- **Forte expansion** depuis 50 ans et qui continue
 - > **Préoccupations environnementales**
 - > **Nécessité d'une gestion agroécologique multi-échelle**
(parcelle, exploitation, bassin versant....) qui s'appuie sur une **recherche intégrée**



Map showing the extent of oil palm cultivation in 43 oil palm-producing countries in 2006 (FAO 2007).



Système de production & Itinéraire de fertilisation

Production d'huile de palme

Résidus organiques

Récolte



Stratégie d'allocation des résidus organiques ?
➤ Efficacité maximum + impact env. minimum



Fertilisants chimiques



Fertilisants organiques

Effluents



Rafles



Diminue besoin



Interrelations dans le système de régulation biologique du sol



Organic inputs

Plant cover, Fronds,
EFB, POME, Compost

Mineral Fertilizers

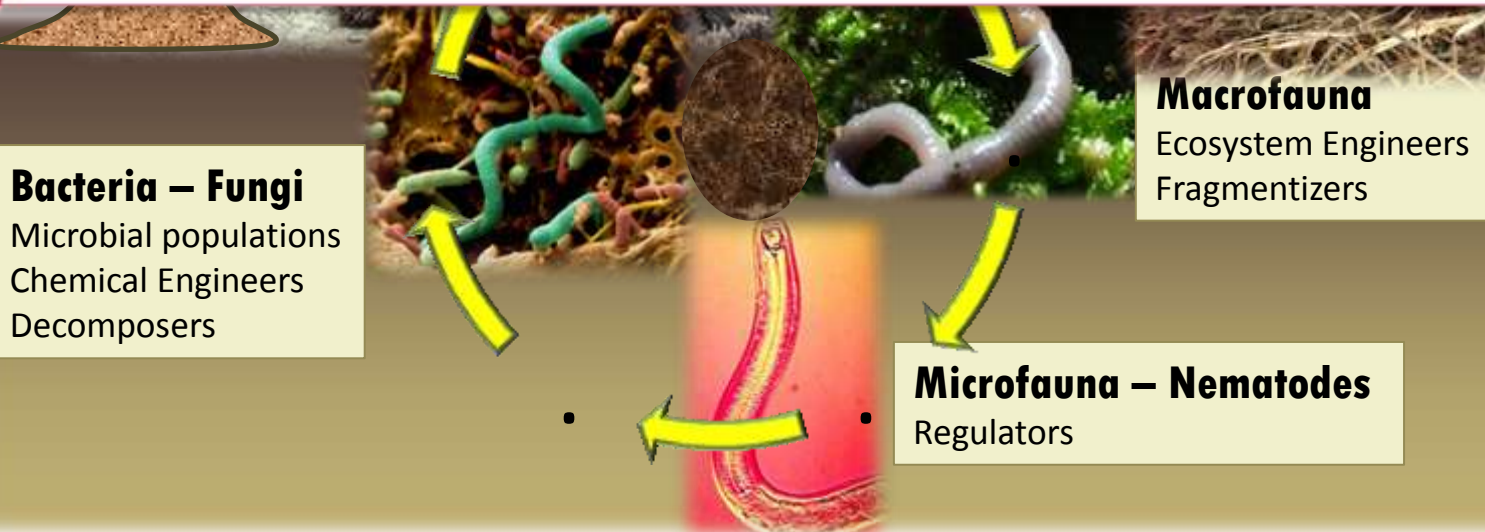
Rôle des organismes vivants du sol:

- Structure du sol
- Conversion C- matière organiques du sol
- Recyclage de nutriments
- Réduction des maladies en équilibrant les populations proies / prédateurs

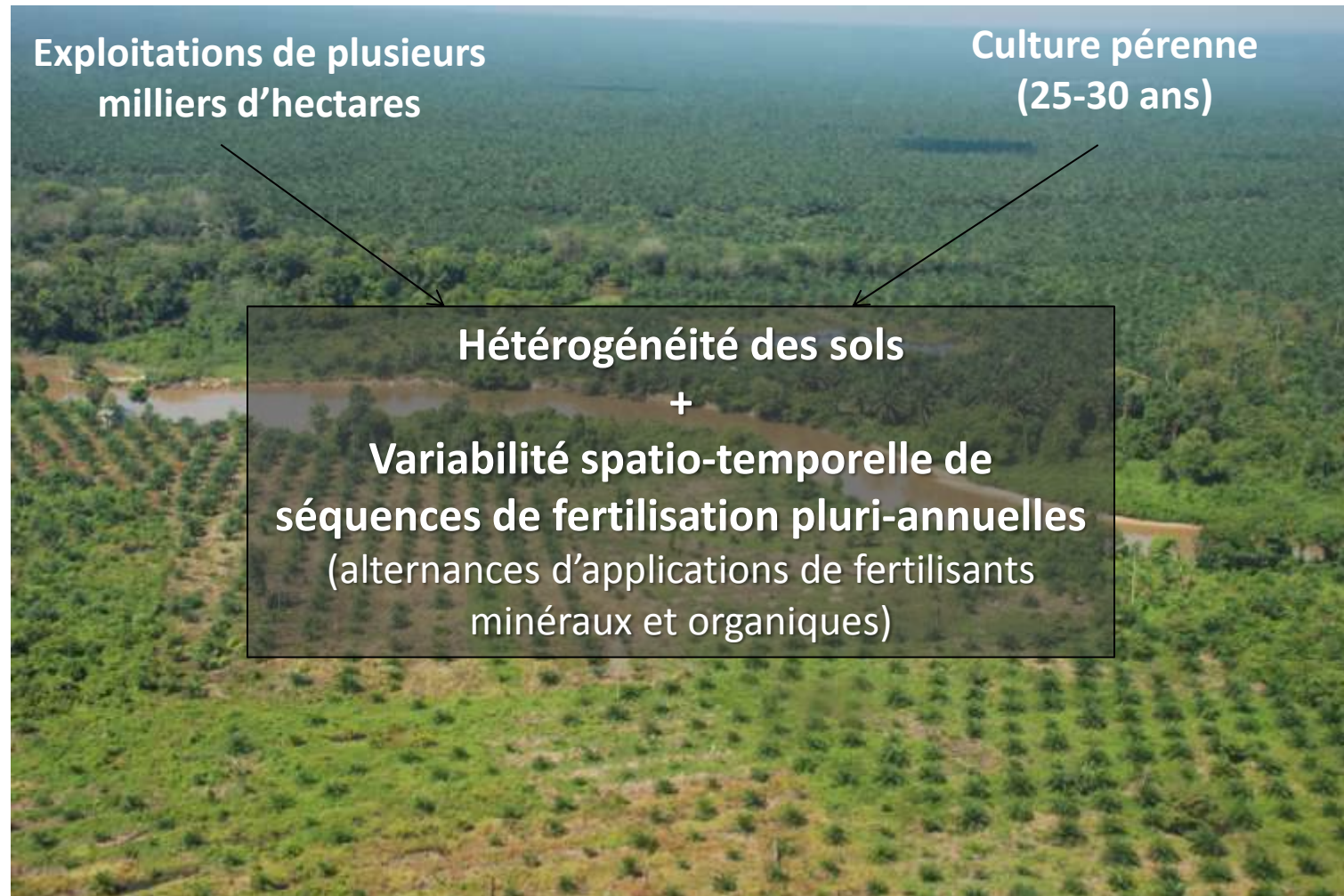
(from Lavelle et al., 2001)

Sol = support de culture + filtre environnemental

➤ **Impacts de la fertilisation sur le sol ? Sur l'eau ?**



Impacts de la fertilisation (chimique vs organique) sur le sol ? Sur l'eau ?

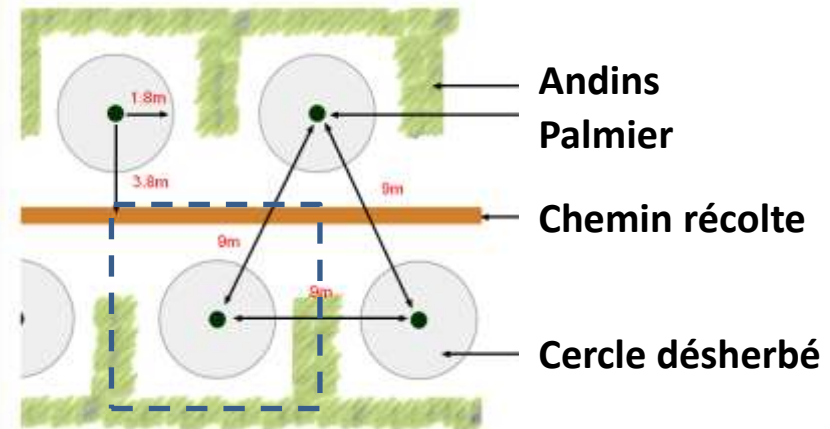


Questions de recherche

Impacts de la fertilisation (chimique vs organique) sur le sol ? Sur l'eau ?



Structure parcelle



- Hétérogénéité des sols
- Variabilité spatio-temporelle des applications de fertilisants
- Hétérogénéité de la structure de la parcelle

Revue de littérature

Beaucoup d'essais agronomiques....

- À l'échelle de la parcelle (e.g. Abu Bakar et al., 2011)
- Avec applications fertilisants à court-terme (e.g. Christancho et al., 2011)
- Relation intrants/rendements

.... Mais pas (ou peu)...

- sur la biologie du sol
- à l'échelle du paysage
- séquences pluri-annuelles de fertilisants



Beaucoup d'études hydrologiques....

- Bassins versants forestiers (e.g. Yusop et al., 2007)
- Après déforestation (e.g. Bruijnzeel, 1990)

Peu d'études hydrologiques

- Plantation de palmiers à huile (< 10 ha) (e.g. Banabas et al., 2008)

.... Mais pas (ou peu)....

- plantations matures
- à l'échelle du bassin versant
- évaluation de la qualité des eaux

Comte et al., 2012. *Advances in Agronomy* 116, 71-124.

Impacts de la fertilisation ?

Etudes multi-échelles et multidisciplinaires

Eaux de surfaces & souterraines

1- Etude hydrochimique

Qualité des eaux .

Transfert de nutriments.

Influence des pratiques et types de sol?

Fertilité chimique et biologique, parcelle

3- Etude pédologique (30 ha)

Fertilité chimique et biologique du sol.

a/Variabilité spatiale dans la parcelle ?

b/Variation temporelle après fertilisation

Fertilité chimique, échelle paysage

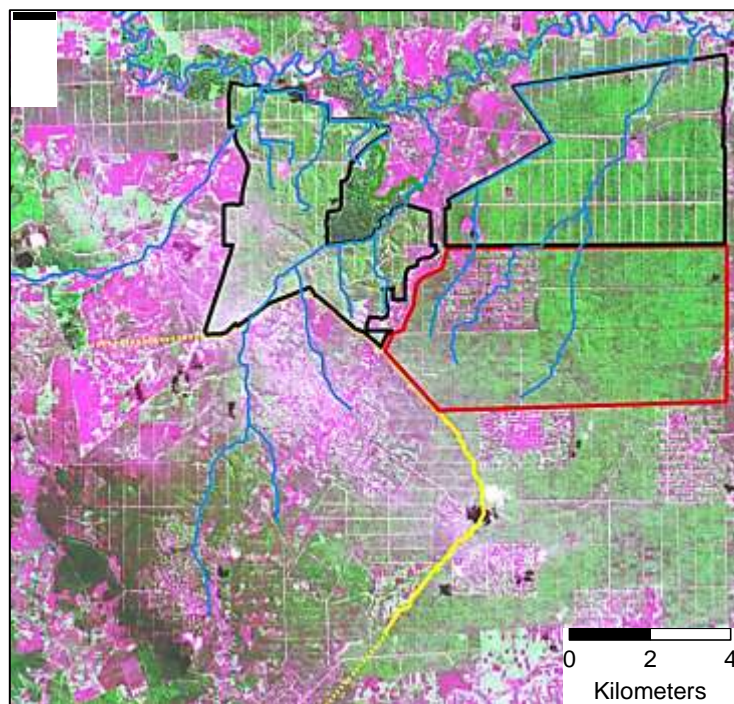
2- Etude pédologique (4000 ha)

Fertilité chimique des sols.

Séquences de fertilisation pluri-annuelles.

Influence des types de sol ?

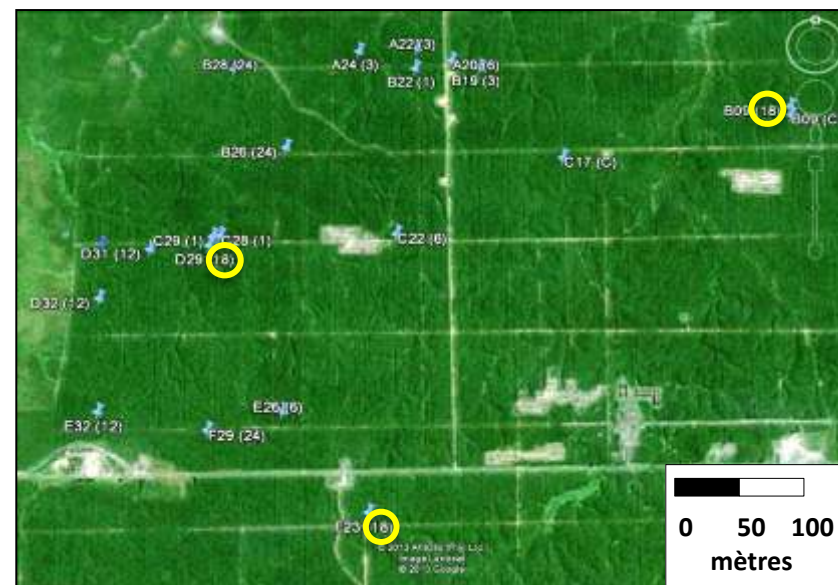
Zones d'étude



Plantation Rama-Rama

Land uses

- Nucleus oil palm plantation
- Plasma oil palm plantation
- Forest
- Independent smallholder area
- River



Plantation Libo

Etude hydrochimique (nappes et bassins versants)

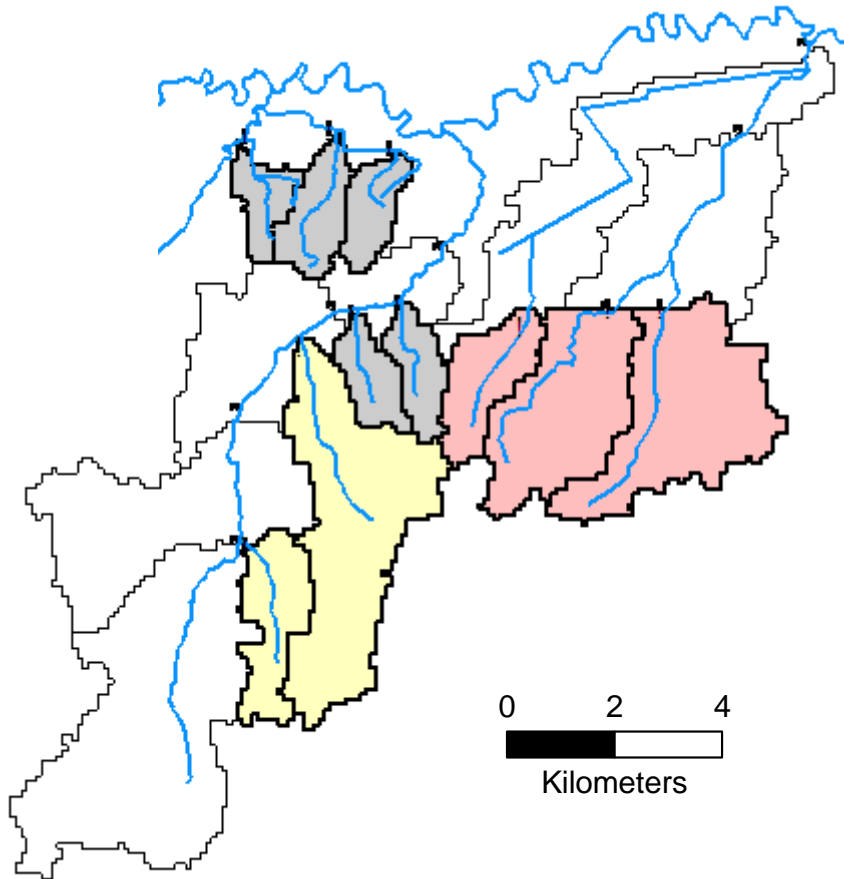
Protocoles & Analyses

Fertilité chim. & biol., parcelle

Fertilité chimique, échelle paysage

Dispositif de suivi hydrochimique

Bassins versants



Watersheds

- Independent smallholder
- Industrial
- Supported smallholder (plasma)
- Nested watersheds

River sampling site

- Headwatershed
- Nested watershed

Suivi manuel (bimensuel, 1 an)

- 16 sites
- Prélèvement d'eau
- Débit / hauteur d'eau

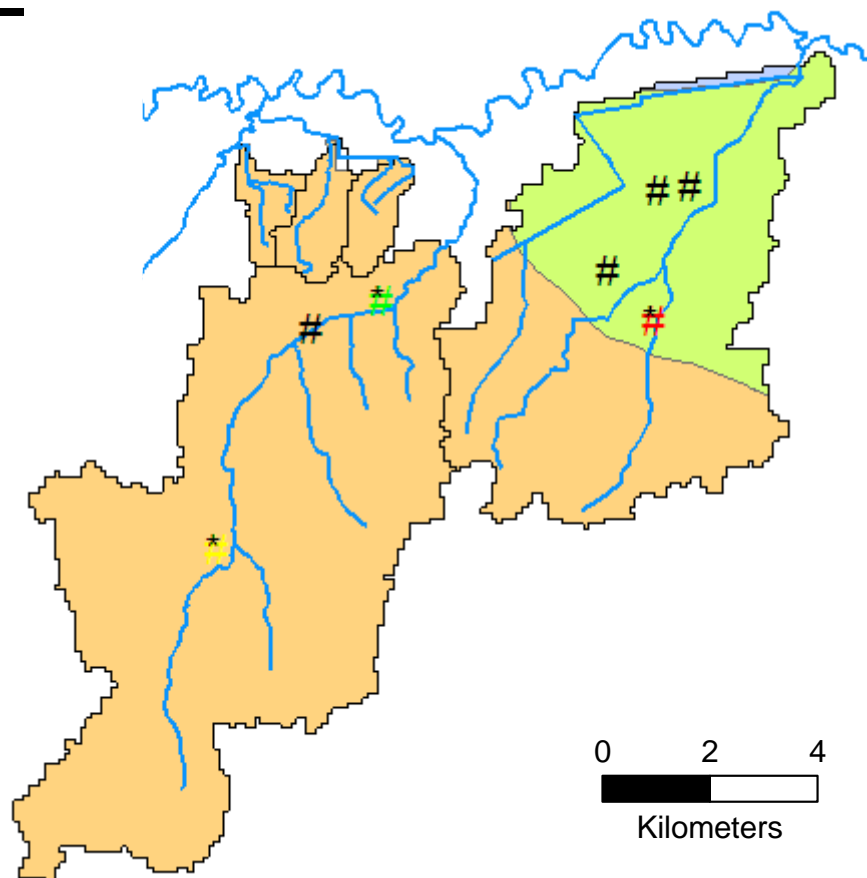
Interpolation temporelle

- Concentration (moyenne)
- Reconstitution débit (modèle hydrologique)
- Flux = concentrations x débit



Dispositif de suivi hydrochimique

Eaux souterraines



Loamy lowland
Loamy-sand upland

- ▲ Unfertilized hevea
- ▲ Industrial oil palm
- ▲ Undisturbed forest
- ▲ Smallholder oil palm

Suivi manuel (bimensuel, 1 an)

- 7 piézomètres
- Prélèvement d'eau souterraine
- Hauteur de la nappe



Fertilité chimique à l'échelle du paysage

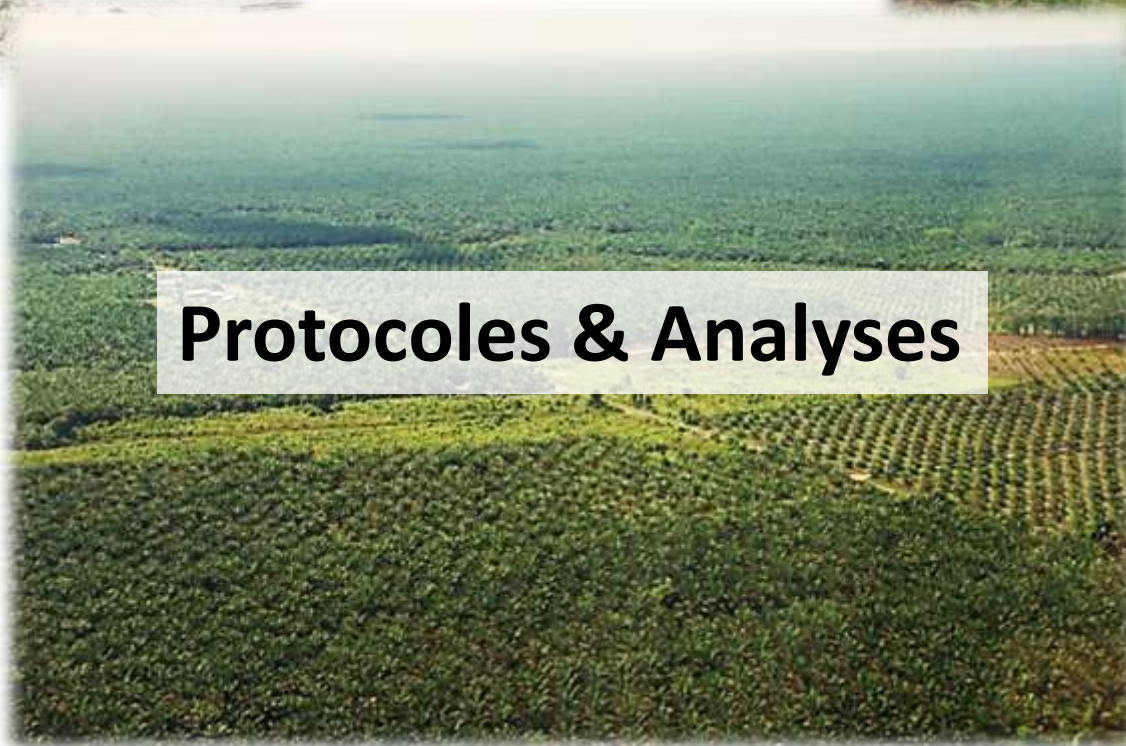
Eaux de surfaces & souterraines



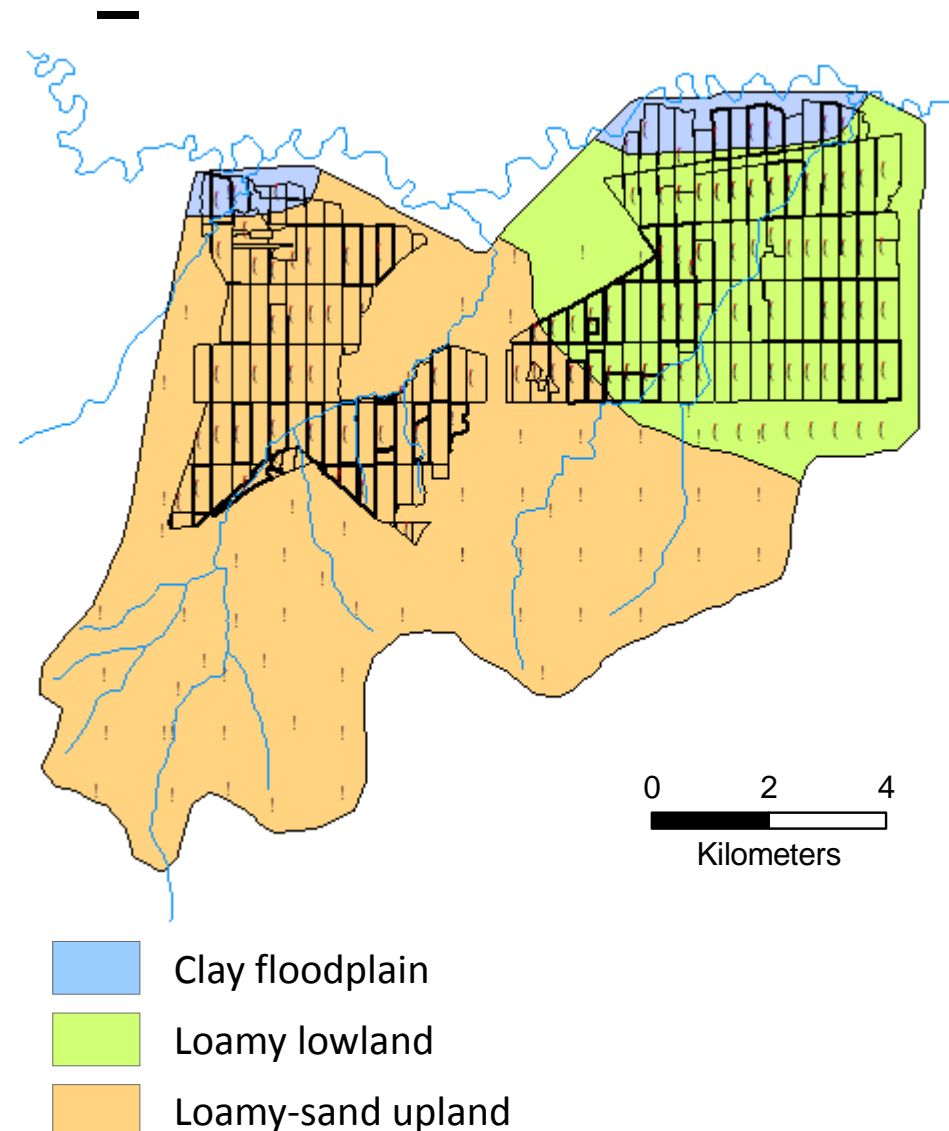
Fertilité chim. & biol., parcelle



Protocoles & Analyses



Protocole d'échantillonnage de sol (échelle paysage)



Echantillonnage stratifié (0-15 cm)

Dans plantation



- parcelle 30 ha
- 3 Composites à partir de 3x18 sous-échantillons

Alentours



Grille régulière 1 km

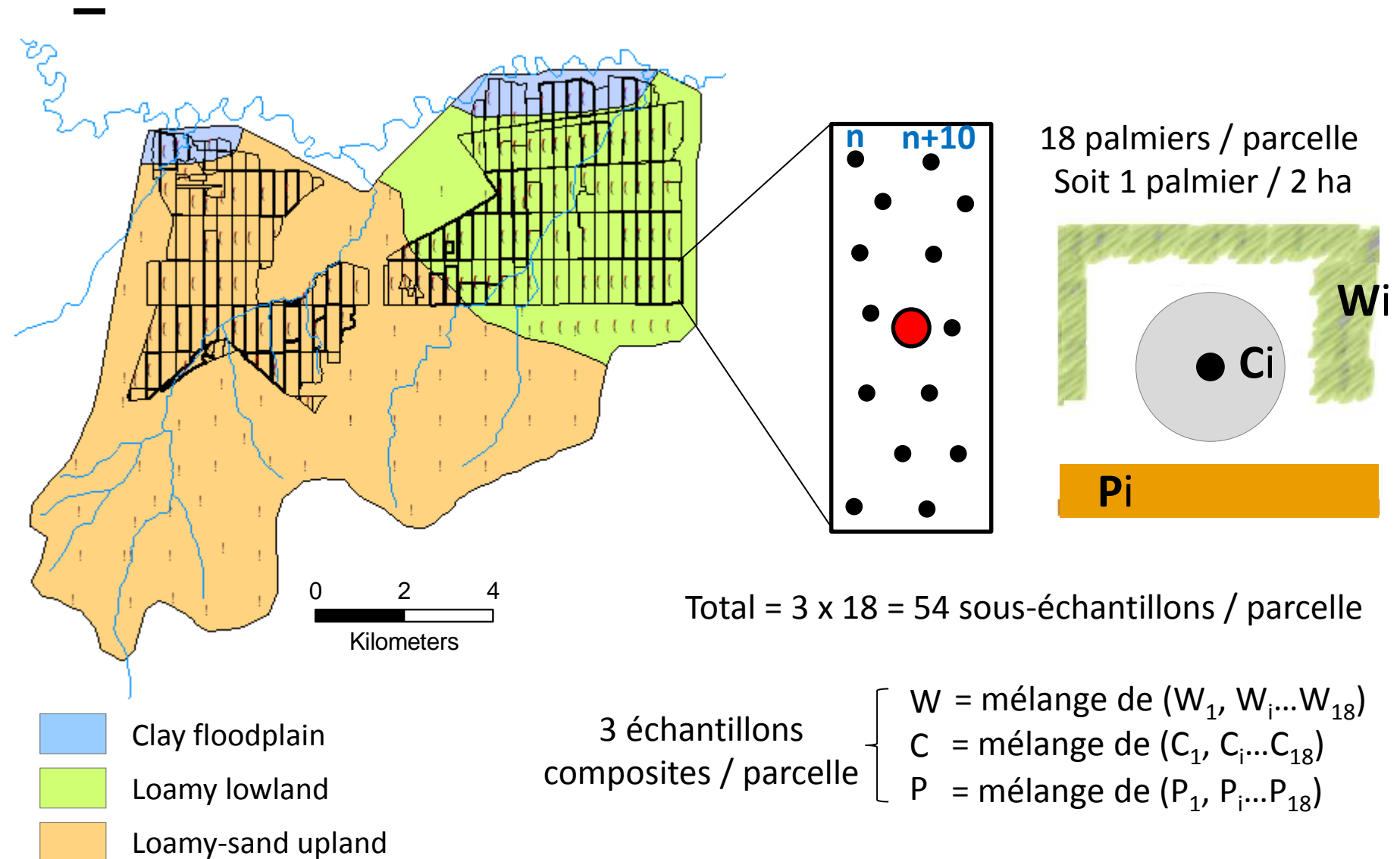
Paramètres mesurés

Texture, pH, CEC

C organique, N total,

Cations échang. (K , Mg, Ca)

Protocole d'échantillonnage de sol (échelle paysage)



Agrégation temporelles des données de fertilisation

Hétérogénéité des séquences de fertilisation pluri-annuelles

	Fertilization sequence						
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
1	M	M	M	M	M	M	M
2	O	M	M	M	M	M	M
3	O	O	M	M	M	M	M
4	O	O	O	M	M	M	M
5	M	M	M	M	M	O	M
6	O	O	M	O	M	M	M
7	M	O	M	M	M	O	M
8	O	O	M	M	M	O	M
9	O	O	O	O	M	M	M
10	M	O	O	M	M	O	M
11	O	O	O	M	M	O	M
12	O	O	O	M	M	M	O
13	O	O	M	O	M	O	M
14	O	M	O	M	O	O	M
15	O	O	O	O	M	M	O
16	O	O	O	M	O	O	M
17	O	O	O	O	O	O	M
18	O	O	O	O	M	O	O
19	O	O	O	M	O	O	O
20	O	O	O	O	O	O	O

M: Application of chemical fertilizers

O : Application of organic fertilizers

Système non expérimental

- 20 séquences différentes
- 96 parcelles



Aucun échantillonnage antérieur

Comment évaluer et comparer la réponse du sol aux fertilisants chimiques vs. organiques?



Hétérogénéité des séquences de fertilisation pluri-annuelles

Fertilization sequence							
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
1	M	M	M	M	M	M	M
2	O	M	M	M	M	M	M
3	O	O	M	M	M	M	M
4	O	O	O	M	M	M	M
5	M	M	M	M	M	O	M
6	O	O	M	O	M	M	M
7	M	O	M	M	M	O	M
8	O	O	M	M	M	O	M
9	O	O	O	O	M	M	M
10	M	O	O	M	M	O	M
11	O	O	O	M	M	O	M
12	O	O	O	M	M	M	O
13	O	O	M	O	M	O	M
14	O	M	O	M	O	O	M
15	O	O	O	O	M	M	O
16	O	O	O	M	O	O	M
17	O	O	O	O	O	O	M
18	O	O	O	O	M	O	O
19	O	O	O	M	O	O	O
20	O	O	O	O	O	O	O

M: Application of chemical fertilizers

O : Application of organic fertilizers

Construction d'un index

Fertilizer sequence value (FSV)

$$FSV = k \sum_{i=Y1}^{Yn} Y_i \cdot F_i$$

k : normalization coefficient

Y_i : time coefficient

F_i : fertilizer coefficient



Index pondéré en fonction:

- **Type de fertilisant** (chimique ou organique)
- **Ancienneté de l'application**

Agrégation temporelle : classification parcelles

Information qualitative complexe -> information quantitative agrégée

Fertilization sequence							FSV
2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
M	M	M	M	M	M	M	-50
O	M	M	M	M	M	M	-45
O	O	M	M	M	M	M	-34
O	O	O	M	M	M	M	-18
M	M	M	M	M	O	M	-18
O	O	M	O	M	M	M	-13
M	O	M	M	M	O	M	-7
O	O	M	M	M	O	M	-2
O	O	O	O	M	M	M	4
M	O	O	M	M	O	M	9
O	O	O	M	M	O	M	14
O	O	O	M	M	M	O	20
O	O	M	O	M	O	M	20
O	M	O	M	O	O	M	30
O	O	O	O	M	M	O	41
O	O	O	M	O	O	M	41
O	O	O	O	O	O	M	63
O	O	O	O	M	O	O	73
O	O	O	M	O	O	O	79
O	O	O	O	O	O	O	100

M: Application of chemical fertilizers

O : Application of organic fertilizers

Construction d'un index

Fertilizer sequence value (FSV)

$$FSV = k \sum_{i=Y1}^{Yn} Y_i \cdot F_i$$

k : normalization coefficient

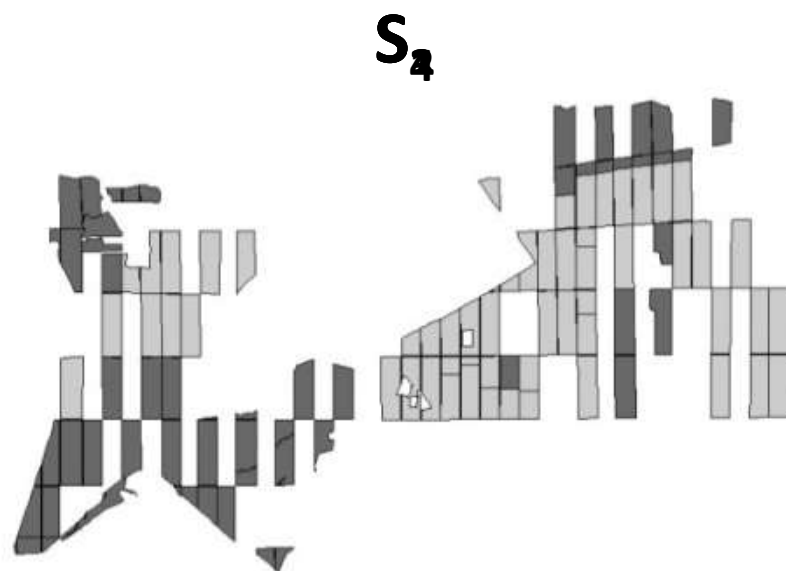
Y_i : time coefficient

F_i : fertilizer coefficient





Agrégation temporelle : classification parcelles

Analyses statistiques comparatives pour chaque groupe et par type de sol



Toutes les séquences

-  **chemical dominant** fertilizer sequences
-  **organic dominant** fertilizer sequences

Fertilité chim. & biol. à l'échelle de la parcelle

Eaux de surfaces & souterraines



Protocoles & Analyses



Fertilité chimique, échelle paysage



Protocole d'échantillonnage de sol (échelle parcellaire)

Variabilité spatiale



(Auriac, 2012,
MFE ingénieur ENSAT (Toulouse)-
IrcSupAgro (Montpellier)

(Pierrat, 2013,
MFE ingénieur ISA (Lille)

Variabilité temporelle



1 mois



3 mois



6 mois



12 mois

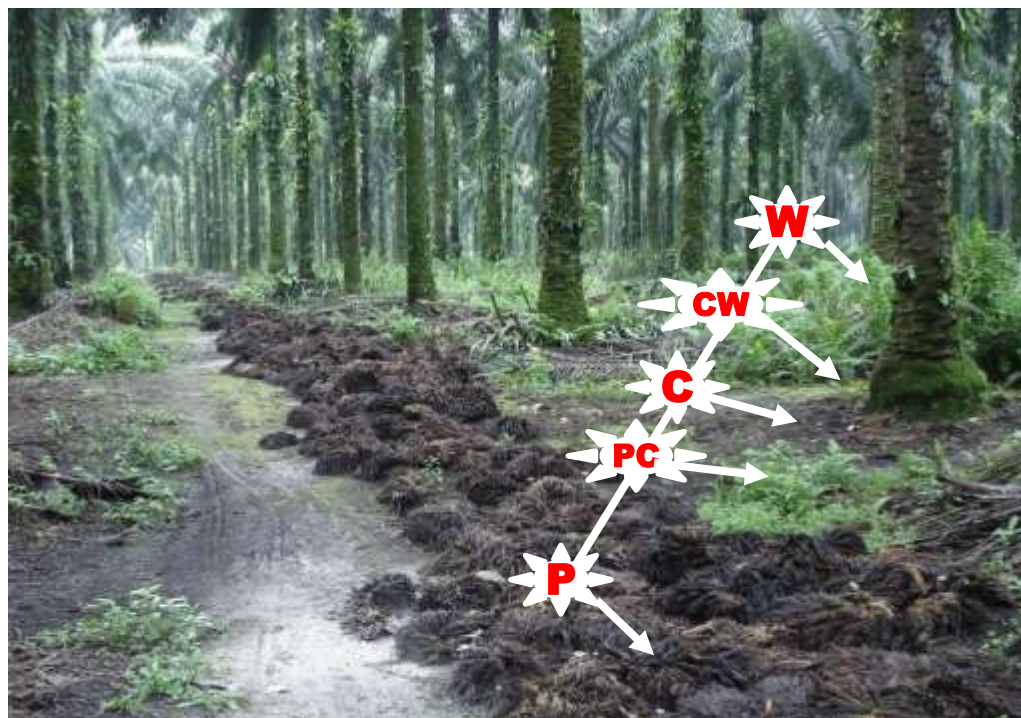


18 mois

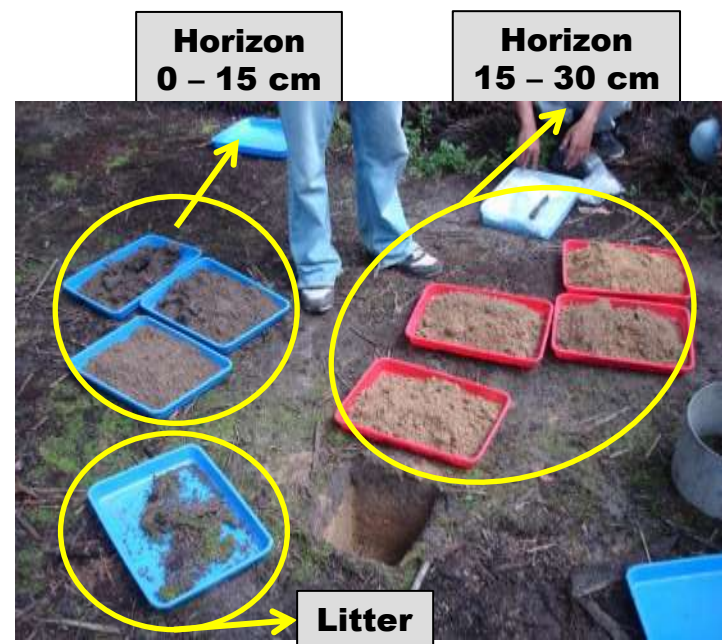
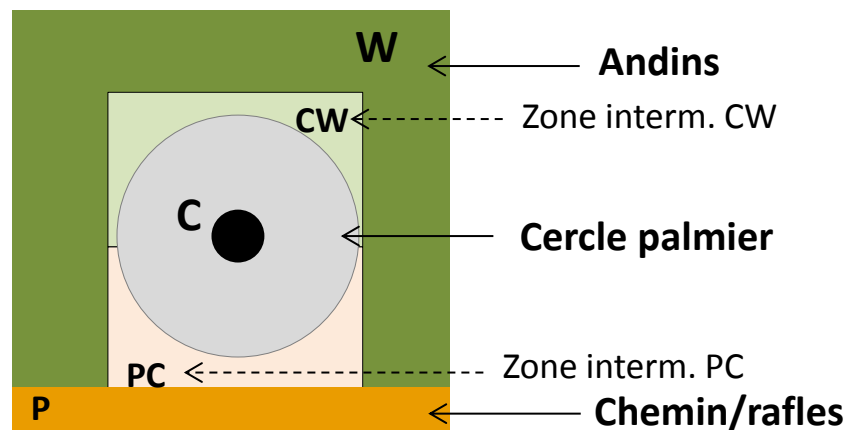


24 mois

Protocole d'échantillonnage de sol (échelle parcellaire)




	Physical & chemical traits	Macro-fauna	Nemato-fauna	Micro-organisms
W	X	X	X	X
CW	X	X		
C	X	X	X	X
PC	X	X	X	X
P	X	X		



Etude hydrochimique (nappes et bassins versants)



Résultats

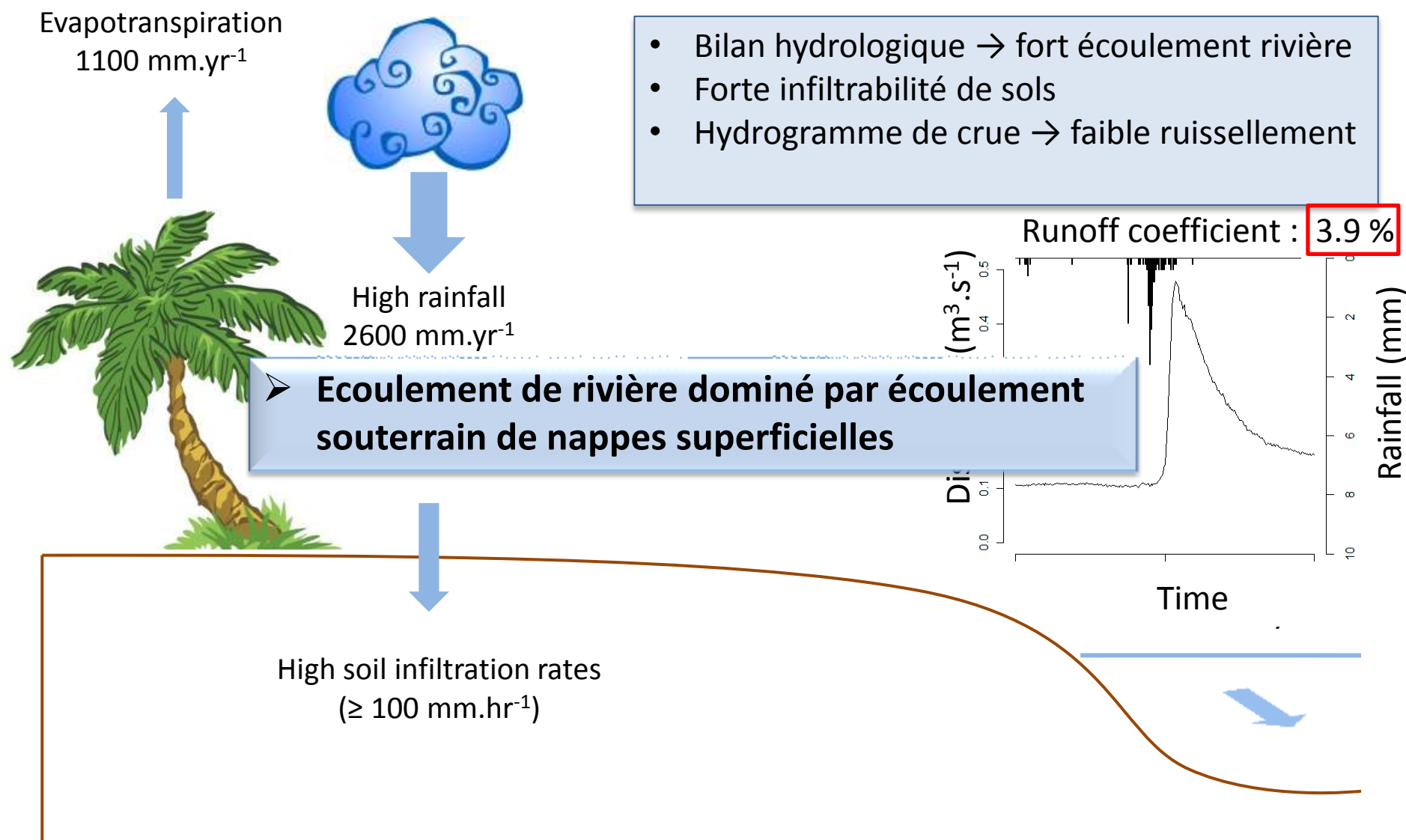


Fertilité chim. & biol., parcelle

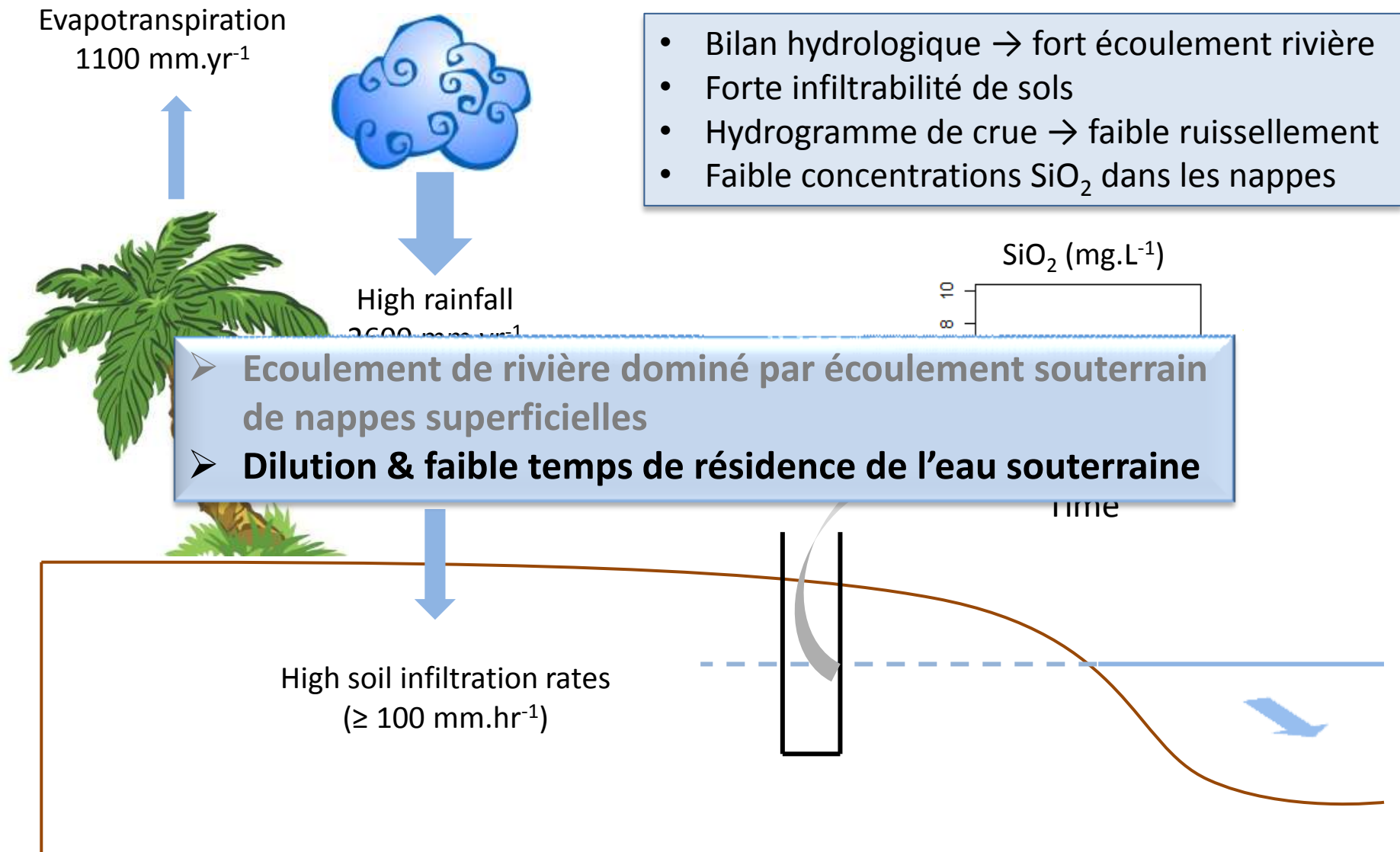


Fertilité chimique, échelle paysage

Processus hydrologiques dominants



Processus hydrologiques dominants



Qualité de l'eau (bassins versants)

Low nutrient concentrations (mg L⁻¹)

Parameters	Total P	N-NO ₃	N-NO ₂	KMgCa	TDS
Range	0.01-0.07	0.1-1.0	0.01-0.02	1.1-3.8	35-55
Standard	< 0.2 (P₂O₄)	< 10	< 0.06	-	< 1000

Acidic waters

pH

Range	4.4 – 5.4
Standard	6 - 9

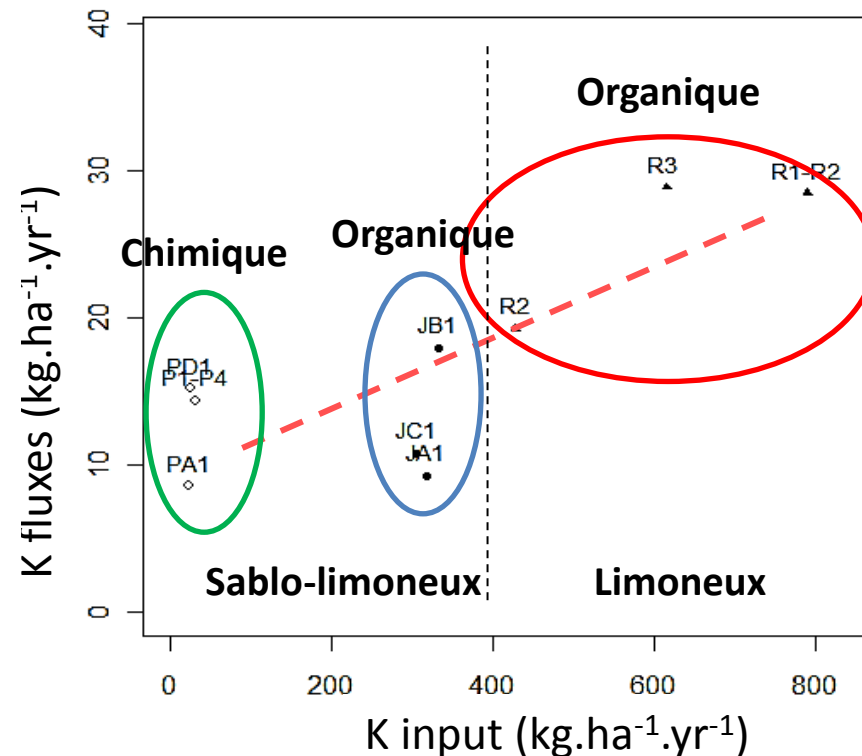
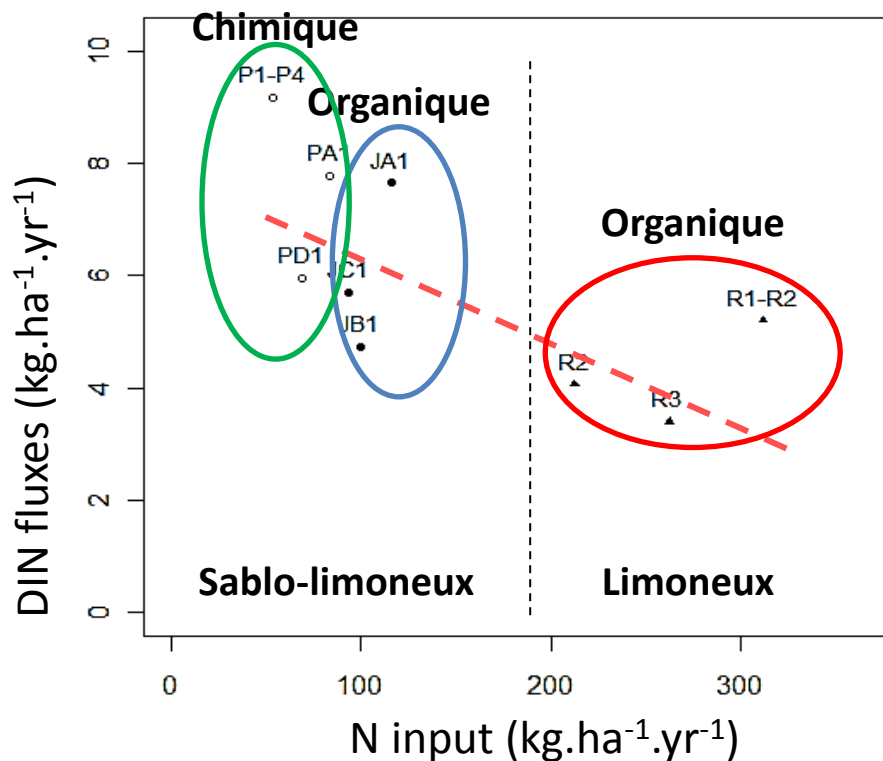
High organic matter contents (mg O₂ L⁻¹)

Parameters	BOD	COD	DO
Range	4.6 – 6.4	21 - 31	6.5- 7.4
Standard	< 3	< 25	< 4

Transferts de nutriments (bassins versants)

N, P, Mg : Intrants \nearrow , flux \searrow

K : Intrants \nearrow , flux \nearrow



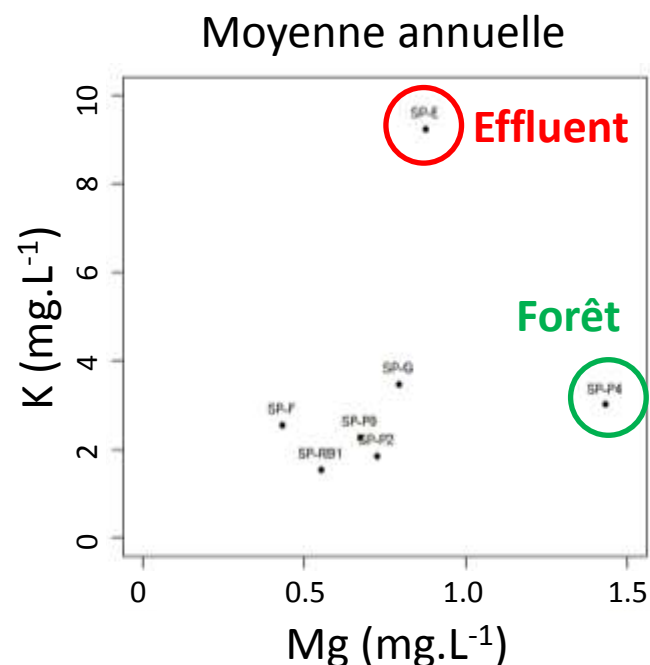
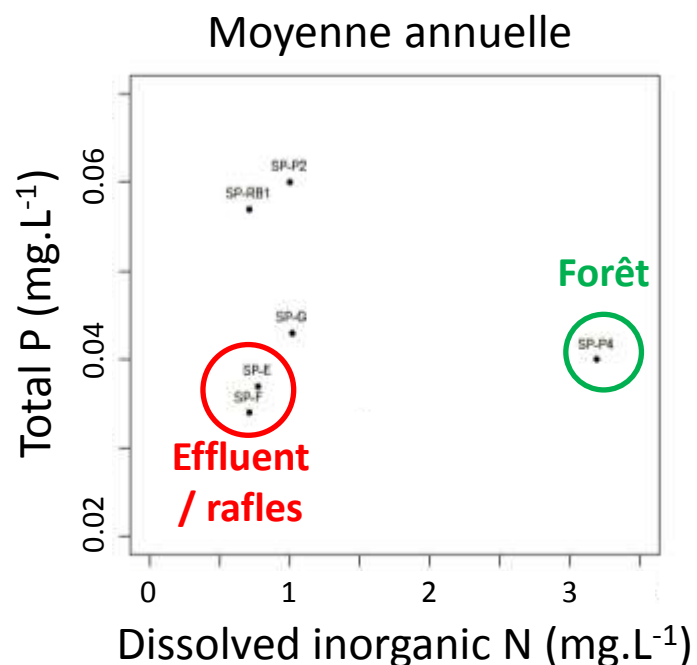
Plus d'intrants MAIS moins de flux

- Sols limoneux
- Fertilisation organique dominante

Forte teneurs de K dans résidus org.

- Intrants K > demande du palmier

Qualité d'eau des nappes



- Forte demande en nutriments du palmier (Ng, 2002) & fertilisation raisonnée
- Concentrations en DIN et TP plus faible sous fertilisation organique
- Fortes concentrations en K sous applications d'effluents (POME)

Comte et al. Soumis à Agriculture, Ecosystems & Environment

Fertilité chimique à l'échelle du paysage

Eaux de surfaces & souterraines



Fertilité chim. & biol., parcelle



Résultats



Etude pédologique à l'échelle du paysage



Fertilisants organiques



Applications
fréquentes

Limoneux



Fertilité chimique ↗ ($p < 0.05$)

Sablo-limoneux



Fertilité chimique ↗ ↗ ↗ ($p < 0.01$)

pH, CEC, C organique, N total, cations échangeables, saturation bases

- Fertilisation organique a significativement amélioré les propriétés chimiques des sols
- Amélioration plus importante sur les sables limoneux quand les applications sont répétées régulièrement

~ 300 échantillons, 20 séquences

Comte et al. 2013 Agriculture Ecosystems & Environment

Fertilité chim. & biol. à l'échelle de la parcelle

Eaux de surfaces & souterraines



Résultats

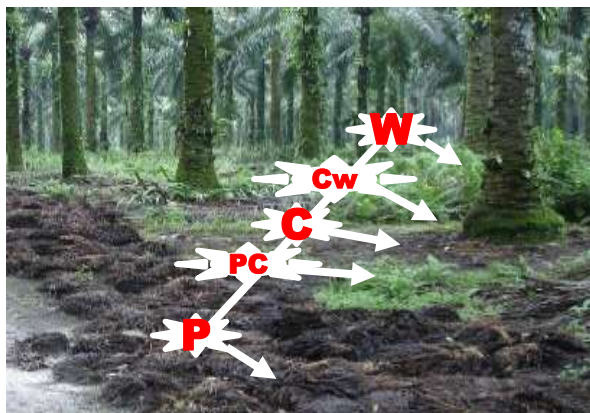
Fertilité chimique, échelle paysage



Variabilité spatiale

1- Comparaison entre les zones

Soil depth: 0 – 15 cm
3 months after EFB application



Referring to W zone “with EFB”

□ No difference

+ / + / + More than “W zone in EFB”

- / - / - Less than “W zone in EFB”

Minérale

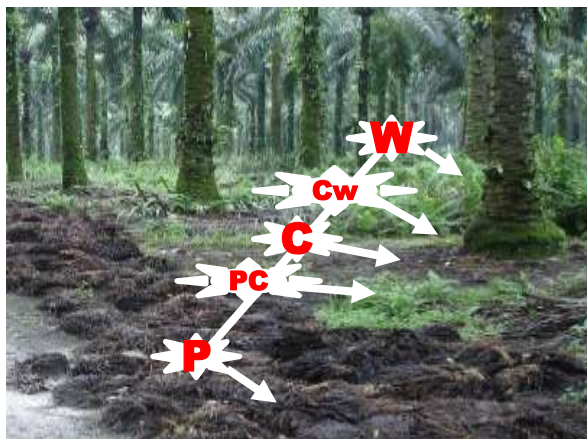
Rafles

P	PC	C	CW	W	Soil parameters	P	PC	C	CW	W
					pH	+				←
	++	+++			P	+		++		←
		+			K	+++	+	++		←
-	-	+			CEC	-		+		←
-	-	+		-	Ca			+	-	←
		+			Mg	+	+	++		←
		+	+		Saturation	+++	++	++		←
---	---	-	-		Organic cover (biomass)		--		-	←
--			-	-	Macrofauna (biomass)	-	+	+		←
--	-	-	-		Macrofauna (Density)	-	-		-	←
--	-	++	-	-	Earthworms (Density)	--	++	-	-	←
---	-	-	-		Ants (Density)	--	---		-	←
---	---			-	Dermaptera (Density)	---	---			←




Variabilité spatiale

2- Comparaison entre les pratiques : rafles vs chimique (zone à zone)

Soil depth: 0 – 15 cm
3 months after EFB application



Soil parameters	P	PC	C	CW	W
pH	Increase	No difference	No difference	No difference	No difference
P	Increase	Decrease	Decrease	No difference	No difference
K	Increase	Increase	Increase	No difference	No difference
CEC	No difference	Increase	Increase	No difference	No difference
Ca	Increase	Increase	No difference	Decrease	Increase
Mg	Increase	Increase	Increase	No difference	No difference
Saturation	Increase	Increase	Increase	Decrease	No difference
Organic cover (biomass)	Increase	Increase	No difference	No difference	No difference
Macrofauna (biomass)	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase
Macrofauna (Density)	Increase	Increase	Increase	No difference	No difference
Earthworms (Density)	Increase	Increase	Decrease	No difference	Increase
Ants (Density)	Increase	Decrease	Increase	No difference	No difference
Dermaptera (Density)	Increase	No difference	No difference	No difference	Increase

 No difference
 Increase
 Decrease

Variabilité temporelle

Comparaison rafles vs chimique, au fil du temps

→ Referring to P zone "without EFB"	1 to 6 mo	12 to 18 mo	24 mo
Bulk density	+	++	+++
C organic	+	+	++
pH	+++	+	
N tot	+	+	++
K	+++	+	+
CEC	++	+	+++
Ca	+	++	++
Saturation	+++	++	+
Organic cover (biomass)	+++	++	+
Macrofauna density	+++	+	++
• Earthworms	-	++	+++
• Ants	+++	+	+
• Coleoptera	+++		++
• Diplopodes	---	+	+++
• Dermaptera	+	+	+++
Nematofauna density		++	++
• N bacterivorous		+	++
• Maturity Index (MI)	-		
• Index for breaking down (NCR)	+		

- Horizon organique (0 - 3.5 cm)
- Zone P
- 1 à 24 mois après application rafles

Carron et al., ICOPE 2014

Carron et al., soumis à EJSB



Synthèse multidisciplinaire & multi-échelle



- **Cohérence et complémentarité des résultats ?**
- **Quelles implications pour l'ingénierie ? Pour la recherche ?**

Cohérence , complémentarité ?

1- **Cohérence** des résultats entre différentes échelles -> renforce conclusions

- ✓ Même effet type de sol et pratiques sur transferts de nutriments aux échelles nappe et bassins versants
- ✓ Même effet des applications rafles vs fertilisants chimiques sur fertilité chimique aux échelles parcelle et paysage

2- **Complémentarité** des informations -> meilleure compréhension des processus

- **Echelle bassins versants** : Intrants vs exports : effet différencié selon nutriments
- **Echelle nappe** : Suggère un fort prélèvement de nutriments par le palmier (vs forêt)
- **Echelle paysage** : Effet du type de sol dans la réponse du sol aux applications de fertilisants organiques
- **Echelle parcellaire** : Paramètres biologiques. Variation spatiale autour du palmier
- **Echelle pluri-annuelle** : Effet de l'hétérogénéité des séquences de fertilisation sur les propriétés chimiques des sols
- **Echelle annuelle** : Variation temporelle des paramètres chimiques et biologiques en fonction du temps écoulé après application de fertilisants organiques

Cohérence , complémentarité ?

2- **Complémentarité** des informations ? -> meilleure compréhension des processus

Echelle paysage, fertilisation pluri-annuelle

- Applications fertilisants organiques bénéfiques pour la fertilité chimique
Mais effet diminue avec espacement des applications
- **Renouveler applications régulièrement, surtout sur sol sensible au lessivage**

Echelle parcellaire, une application fertilisants

- Effet encore perceptible après 24 mois
- Forts pics de pH (> 9) après application des rafles
-> perturbation du biote : fuite de vers de terre
- **Espacer les applications pour ne pas gâcher la MO sensée nourrir le biote**



- **Implications pour l'ingénierie agroécologique**
- **Recherche : Évolution protocoles et nouvelles questions**

Implications pour l'ingénierie agro-écologique

Implications pour l'ingénierie agroécologique ?

- **Régime pluvieux + fertilisation raisonnée + forte capacité absorption du palmier mature**
→ Peu de risques de pollution des eaux par les nutriments (N, P), fortes exportations K
- **Tenir compte des types de sol**
→ Privilégier renouvellement sur les sols les plus sensibles (sableux) pour maintien de la fertilité chimique à long terme
- **Tenir compte de la viabilité du biote du sol**
→ Stabiliser MO du sol pour nourrir le biote plutôt qu'activer minéralisation (déjà très rapide). Procédés de compostage?
→ Faut-il varier zones d'applications de rafles au sein de la parcelle ?
→ Epandre sur les chemin de récolte ou sur les zones végétalisées plus riches en biote ?
→ Adapter la fréquence et la quantité d'application en fonction du biote. Et compléments chimiques pour répondre à demande du palmier. Mieux les répartir spatialement.

Implications pour la recherche

1- Evolution des protocoles grâce au multi-échelle



Echelle paysage -> évolution des protocoles à l'échelle parcellaire

- Interaction type de sol/résidus sur le biote
- Utilisation de l'index pour qualifier l'historique de fertilisation des parcelles



Echelle parcellaire -> évolution des protocoles à l'échelle paysage

- Prélèvements sur zones dont surface > 5% de la parcelle (3 en chq, 4 en org)
- Pondération valeur parcellaire en fonction des surfaces relatives des zones autour du palmier
- Echantillonnage sol en fonction des périodes d'applications

Implications pour la recherche

2- Nouvelles questions de recherche

- Rapide renouvellement des nappes + MO dissoutes exportées dans les eaux
-> Devenir des produits phytosanitaires (si application)?
- Variation des impacts en fonction du contexte (climat, lithologie, phase de culture, pratiques)?
- Quelle incidence des différents modes de recyclage des résidus (effluents, rafles, compost) sur le biote du sol?
- Sur quels sols, systèmes de culture, phase de culture, le recyclage est-il le plus nécessaire?
- Comment intégrer caractéristiques du biote des sols dans l'évaluation de la durabilité des systèmes?

L'agroécologie nous incite à dépasser les barrières d'échelles et de disciplines

- Echanges et concertations entre chercheurs ou leurs équipes
- Coordination des dispositifs de mesures?

Interactions ingénierie & recherche

INGENIERIE

RECHERCHE

1- Intensification de la production

(années 60-80)

- **Gestion fertilisation uniquement chimique**
- Rafles brûlées + épandages cendres
- Effluents déversés dans les rivières



**Pollution atmosphérique
& aquatique**

2- Stratégie productive avec recyclage des résidus organiques

(années 80-2000)

- **Recyclage des rafles et effluents**
-> Apport des résidus organiques raisonnés en apports minéraux sans tenir compte de l'effet organique



**Effet sur le rendements
Essais agronomiques
(Dose? Fréquence?)**

3- Stratégie de gestion agroécologique

(Aujourd'hui)

- **Optimisation gestion fertilisants chim/org**
-> Maintien fertilité globale à long terme
-> Réduction pertes par lessivage
- **Traitement des résidus organiques**
-> Procédés de compostage
-> Lagunes bâchées -> récupération du méthane



**Qualité du sol, des eaux?
Synergie fertilisants M/O?**

Pour aller plus loin

- Compétition plantations / cultures vivrières
- Résidus organiques : recyclage au champ ou valorisation énergétique (méthanisation) ?
- Partage des savoirs (planteurs villageois/industriels)



- Partage des ressources (résidus organiques) : en faire profiter les planteurs villageois

➤ **Réflexion sur la gestion des résidus organiques à l'échelle du bassin de production**

